

Braunschweigische
Wissenschaftliche Gesellschaft

Jahrbuch 2015

Sonderdruck
Seiten 173–186



J. CRAMER Verlag · Braunschweig
2016

Berührungsfreie Lagerungen –Bleibt das „Hoverboard“ ein Zukunftstraum?–*

WOLF-RÜDIGER CANDERS

IMAB Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der TU Braunschweig.
Hans-Sommer-Straße 66, D-38106 Braunschweig, E-Mail: w.canders@tu-braunschweig.de

Im Jahr 1987 kam der Film „Zurück in die Zukunft“ in die Kinos, dessen Handlung im Jahr 2015 spielt und in dem der jugendliche Held sich in einer Szene auf einem räderlosen Skateboard – dem „Hoverboard“ – schwebend über beliebigen Untergründen (Sand, Kies, Gebüsch, Wasser etc.) bewegen kann. Aus diesem Anlass wurde in diesem Jahr in den sozialen Medien umfangreich über die Machbarkeit von „Hoverboards“ spekuliert und das Institut für elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen mit Anfragen zu Schwebetechnologien in Hinblick auf „Hoverboards“ geradezu überschüttet.

In diesem Vortrag soll daher zum Einen auf den Stand der berührungslosen Lagerungen und zum Anderen mit einem Augenzwinkern auf die Möglichkeiten eingegangen werden, ein „Hoverboard“ zu bauen.

Berührungslose Lagerungen, sowohl in rotierender oder auch linearer Ausführung, haben sich in den letzten 20 Jahren wegen ihrer tribologischen Vorteile ein breites Anwendungsfeld erobert. Diese Vorteile sind:

- Reibungs- und Verschleißfreiheit – sehr geringe Verluste, keine Wartung
- Ölfreiheit – kein Ölwechsel, kein Ölverlust
- Hohe mögliche Umfangsgeschwindigkeiten
- Bei Magnetlagern ist die Lagerung in diversen Gasen (auch in aggr. Gasen – Sauer gas) oder im Vakuum möglich

Bei elektromagnetischen geregelten Lagerungen kommt die regelbare Steifigkeit und Dämpfung hinzu, die unter Anderem einen kraftfreien Lauf um die Hauptträgheitsachse erlauben, was sich nach außen als extrem ruhiger Lauf auch bei hohen Drehzahlen äußert.

* Der Vortrag wurde am 27.11.2015 auf der gemeinsamen Sitzung der Göttinger Akademie der Wissenschaften und der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft gehalten.

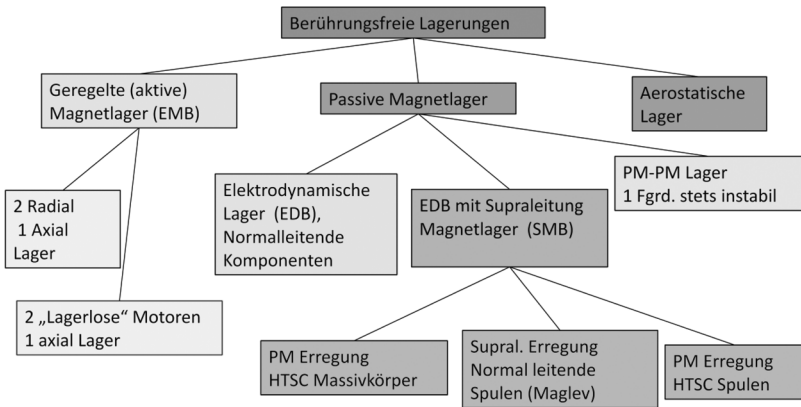


Abb. 1: Klassifizierung berührungsfreier Lagerungen.

Die physikalischen Wirkprinzipien beruhen außer bei den aerostatischen Lagern auf elektromagnetischen oder elektrodynamischen Effekten. Die Lagerungen lassen sich damit gemäß Abbildung 1 klassifizieren. Durch die Nutzung der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) hat sich das Spektrum möglicher Lagerungstechnologien in den letzten 15 Jahren noch deutlich erweitert, so dass dem Anwender heute eine breite Palette möglicher Lagerungstechnologien zur Verfügung steht, die anwendungsspezifisch optimiert werden können.

Wegen dieser Vielfalt sollen die hier angestellten Betrachtungen auf eine kurze Übersicht über die elektromagnetischen Lagerungen und eine etwas vertiefte Betrachtung der elektrodynamischen Systeme beschränkt werden.

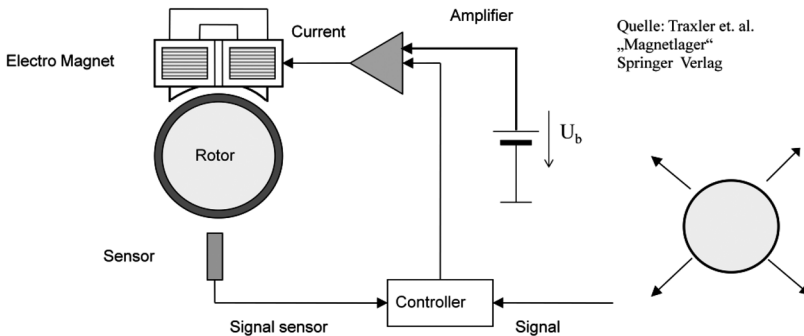
1. Elektromagnetische Lagerungen (Electromagnetic Bearings - EMB)

Diese auch als geregelte oder aktive Magnetlager bezeichneten Lagerungen haben heute einen hohen technischen Stand erreicht und ein breites Anwendungsfeld erobert. Die Lagerkräfte F sind Maxwellsche Anziehungskräfte zwischen Eisenflächen gemäß der Grundgleichung (1).

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} A \quad (1)$$

B: Magn. Flussdichte, μ_0 : Magn. Permeabilität der Luft, A: Lagerfläche

Die felderregenden Spulen sind gegenüber einer Fahrbahn oder einem Rotor aus Eisen angeordnet. Die Kräfte sind stets anziehend (B^2) und es sind hohe



Für n Bewegungsrichtungen sind $n/2$ Regler erforderlich, wenn eine Differenzanordnung verwendet wird.

Abb. 2: Funktionsprinzip eines elektromagnetischen Lagers.

Kraftdichten möglich. Die Lagerung hat aus mechanischer Sicht eine negative Steifigkeit, ist somit instabil und muss durch eine Regelung stabilisiert werden (Abbildung 2).

Verluste entstehen durch die Erregerspulen, die das magnetische Feld aufbauen. Sie sind umso geringer, je kleiner der Luftspalt ist. Typische Luftspalte in EMB liegen zwischen 0,5mm und 1 mm. Beim Transrapid sind es gerade 10 mm. Aufgrund all dieser Fakten macht der Bau eines „Hoverboards“ mit elektromagnetischer Lagerungstechnik keinen Sinn.

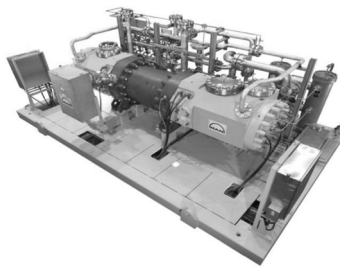
Als typische Anwendungsfelder rotierender elektromagnetischer Lager sollen hier 2 Beispiele dienen sowie ein Beispiel für eine lineare Lagerung:

- 1) Frässpindeln für die Hochgeschwindigkeitszerspanung (Abbildung 3) mit Drehzahlen bis 60 000 1/min
- 2) Turbomaschinen in der Verfahrenstechnik (Abbildung 4). Besonders günstig wirkt sich hier die Möglichkeit, eine hermetische Bauweise zu verwirklichen, aus. Bei Pipelinekompressoren kommt hinzu, dass diese Anlagen oft in schwer zugänglichen, unbewohnten Regionen stehen und wartungsfrei im unbedienten Betrieb laufen müssen.

Ein neueres Anwendungsfeld für die elektromagnetischen Lagerungen hat sich in der Offshore Förderung von Erdgas eröffnet. Hier werden Kompressorstationen und Erdgas Rektifikationsanlagen gerne witterungs- und eisganganabhängig am Meeresgrund aufgebaut (Abbildung 5). Bei Tiefen bis 4000 m ist der entscheidende Punkt die Wartungs- und Verschleißfreiheit der Lagerungen.



Abb. 3: Fräse für die Hochgeschwindigkeitszerspanung .



Bis 130 bar, 50 MW
MAN Produktname: HOFIM

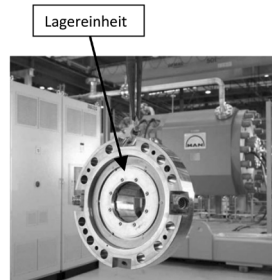
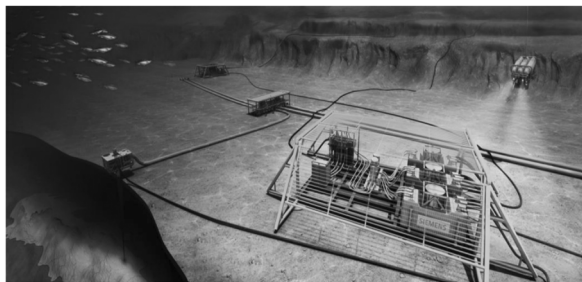


Abb. 4: Hermetischer Pipelinekompressor der Fa. MAN.



Bedingungen: Bis 4000 m Tiefe, kein Verschleiß, kein Ölwechsel

Quelle: Siemens, MAN

Abb. 5: Tiefsee Kompressorstation für die Erdgasförderung mit elektromagnetischer Lagerung der Kompressoren.



Abb. 6: Transrapid Magnetschwebbahn in Shanghai.

- 3) Als lineares Lagerungssystem mit elektromagnetischer Lagerung sei zudem der in Deutschland entwickelte Transrapid erwähnt, der in Shanghai als weltweit einzige kommerzielle Anwendung eines Magnetschwebverfahrens die Verbindung Flughafen – Stadt (Pudong) bedient (Abbildung 6). Auf der ca. 30 km langen Strecke werden Geschwindigkeiten bis zu 420 km/h erreicht.

In einigen Anwendungsnischen findet man sog. „Lagerlose Motoren“, bei denen die Tragfunktion in den Antriebsmotor integriert ist. I. A. wird hier eine Zusatzwicklung mit von der Motorpolpaarzahl p abweichender Polpaarzahl $p+1$ oder $p-1$ verwendet. Für eine vollständige Lagerung muss der Antriebsmotor in zwei Hälften mit einem gewissen Abstand geteilt werden. Zusätzlich ist natürlich eine Axiallagerung erforderlich.

2. Elektrodynamische Lagerungen (Electrodynamic Bearings – EDB)

Elektrodynamische Lager gehören zur Gruppe der passiven Magnetlager (nach Abbildung 1). Ihre Funktion beruht auf dem Induktionsgesetz und dem Lorentzgesetz. Durch die Bewegung eines Erregerfeldes mit der Flussdichte B relativ zu kurzgeschlossenen Spulen werden in diesen Ströme I induziert, die mit dem anregenden Feld wechselwirken und eine Lorentzkraft gemäß den Vektorgleichungen 2 und 3 aufbauen:

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (2)$$

$$\vec{F} = l \cdot (\vec{I} \times \vec{B}) \quad (3)$$

l : wirksame Länge der Spule im Feldbereich

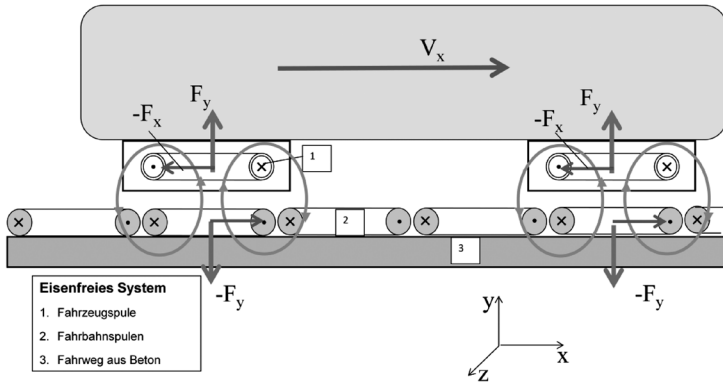


Abb. 7: Elektrodynamische Lagerung in linearer Anordnung.

Das Prinzip ist in Abbildung 7 für eine lineare Anordnung veranschaulicht. Hier bewegt sich ein Fahrzeug mit der Geschwindigkeit v_x und den Erregerspulen 1 über einer Fahrbahn 3, auf der die Reaktionsspulen 2 liegen. Die ganze Anordnung ist eisenlos, da sonst störende Maxwellkräfte auftreten würden.

Die vorzeichenrichtige Anwendung des Induktionsgesetzes, des Lorentzgesetzes und des Newtonschen Prinzips $\text{Actio} = \text{Reactio}$ liefert abstoßende Tragkräfte F_y und auf das Fahrzeug wirkende Bremskräfte F_x , die vom Antrieb des Fahrzeugs überwunden werden müssen.

- Die Lagerung ist inhärent stabil, es ist somit keine Regelung erforderlich.
- Eine Dämpfung kann über die ohmschen Verluste in den Spulen oder zusätzliche Spulensysteme erreicht werden.
- Die Spulen auf der Fahrbahn können auch durch eine leitfähige Schicht ersetzt werden.
- Trag- und Bremskraft sind geschwindigkeitsabhängig (Abbildung 8). Unterhalb einer Geschwindigkeit v_{\min} ist der Induktionsvorgang zu schwach, um eine ausreichende Tragkraft aufzubauen. In diesem Geschwindigkeitsbereich müssen Hilfslager zum Einsatz kommen.

Die Ströme in den Fahrbahnschulen sind aufgrund der Induktivität dieser Schulen gegenüber dem anregenden Feld phasenverschoben. Sie können in einen dissipativen und einen konservativen Anteil zerlegt werden, wobei die Phasenverschiebung mit der Geschwindigkeit (Frequenz) zunimmt. Dies hat zur Folge, dass bei hohen Geschwindigkeiten der konservative Anteil als Rückwirkung auf das anregende Feld überwiegt, so dass die Tragkraft nicht weiter ansteigt aber dafür auch die Bremskraft nahezu verschwindet.

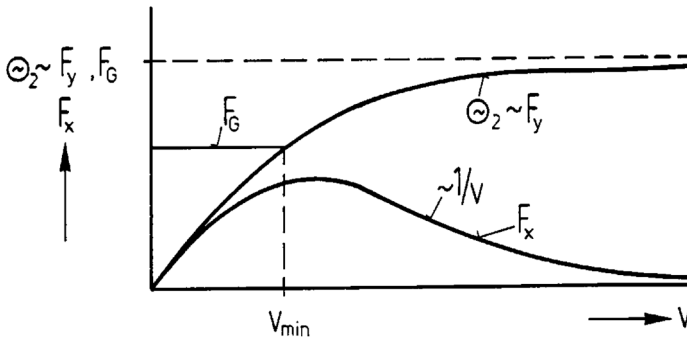


Abb. 8: Entwicklung der Tragkraft F_y und der Bremskraft F_x über der Relativgeschwindigkeit v zwischen Fahrbahn und Fahrzeug. Für $v < v_{\min} \rightarrow F_y < \text{Fahrzeuggewicht } F_G$ – Schweben nicht möglich.

Es ist also zweckmäßig, dass System so zu dimensionieren, dass die Betriebsgeschwindigkeit so hoch ist, dass die Bremskraft kaum noch stört.

Das Prinzip der elektrodynamischen Lagerung kann nun genutzt werden, um ein „Hoverboard“ zu bauen, das dem Filmvorbild schon näher kommt (Abbildung 9). Als Fahrbahn dient eine Kupferplatte, die auch verformt sein kann, z. B. zu einer bei Skateboardern beliebten „Half Pipe“. Auf dem Board selbst

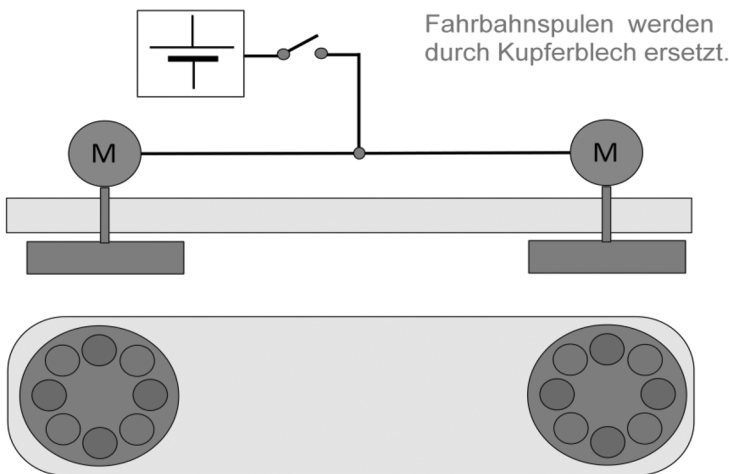


Abb. 9: Prinzipanordnung eines elektrodynamischen „Hoverboards“.



Abb. 10: MAGLEV Zug auf der Teststrecke bei Yamanashi in Japan, Quelle: Japan Rail.

befinden sich mindestens zwei rotierende Magnetteller, die von Elektromotoren angetrieben werden und mit Magneten wechselnder Polarität ausgerüstet sind. Die erforderliche Energiequelle (Batterie) und eine Elektronik zur Steuerung der Motoren müssen auf dem Board untergebracht werden. Durch die schnelle Rotation der Magnetteller ist die Voraussetzung für den Aufbau einer elektrodynamischen Tragkraft F_y auch bei stillstehendem Board gegeben. Im Bereich der Kupferplatte ist eine Bewegung vorwärts und seitwärts möglich. Eine Bewegung außerhalb der Kupferplatte ist natürlich nicht möglich.

Im Internet findet man diverse Videos, auf denen „Hoverboards“ nach diesem Prinzip vorgeführt werden.

Typische Luftspalte elektrodynamischer Lagerung liegen bei 1 mm für rotierende Systeme bis zu 0,5 bis 1 cm beim „Hoverboard“ und bis zu 10 cm bei linearen Systemen (MAGLEV Bahn in Japan).

Die Lagersteifigkeit hängt wesentlich von der magnetischen Flussdichte ab, was bei großen Luftspalten große Erregerdurchflutungen und Stromdichten mit entsprechenden Verlusten erfordert. Es ist daher sehr reizvoll, für die Felderregung supraleitende Spulen zu verwenden (vgl. Abbildung 1), auch wenn der Aufwand für Kryostat und Kühlung erst einmal abschreckend wirkt.

Genau diesen Weg ist man beim japanischen Maglev Zug (Abbildung 10) gegangen, an dem seit den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts, also seit ca. 40 Jahren, gearbeitet wird. Ein Haupttreiber für den Wunsch nach großen Luftspalten sind die in seismisch aktiven Regionen kaum vermeidbaren Fahrbahnsetzungen,

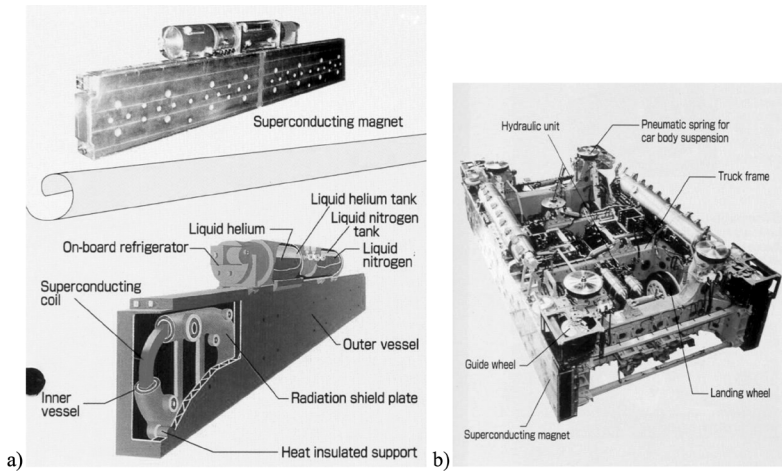


Abb. 11: a) Supraleitende Tragspulen des MAGLEV Fahrzeugs. (Quelle: Japan Rail),
b) Drehgestell

so dass eine erhöhte Toleranz zur Verbesserung der Betriebssicherheit beiträgt. Trotz des großen Luftspaltes werden dank der Supraleitung Flussdichten von 2T erreicht. Das System ist heute soweit ausgereift, dass eine Anwendungstrecke von Tokyo nach Kyoto geplant ist, mit deren Bau in 2014 begonnen wurde und die 2045 fertig gestellt werden soll. Gleichzeitig wurde auf der Yamanashi Teststrecke Anfang 2015 der Geschwindigkeits-Weltrekord für Bahnfahrzeuge mit 603 km/h aufgestellt.

Das Fahrzeug bewegt sich in einem Betontrog, die Trag und Führungspulen sind zusammen mit den Antriebsspulen eines linearen Wanderfeldmotors in den Seitenwänden des Troges untergebracht. Das Magnetfeld für die Tragfunktion dient hier wie beim Transrapid gleichzeitig als Erregerfeld für den Antriebsmotor.

Die bisher verwendeten Tieftemperatur Supraleiter – Arbeitstemperatur 4 K – machen eine aufwändige Kryotechnik mit einer Vorkühlung durch flüssigen Stickstoff und einer Hauptkühlung durch flüssiges Helium erforderlich (Abbildung 11a). Das Fahrzeug wird an den Kopfbahnhöfen jeweils mit dem erforderlichen Vorrat an flüssigem Helium und Stickstoff betankt, so dass an Bord nur die über thermische Lecks eingedrungene Wärme herausgekühlt werden muss.

Es liegt auf der Hand, beim heutigen Stand der Technik auf Hochtemperatursupraleiter mit einer Arbeitstemperatur von 70 K zu wechseln. Diese sind bereits als Bänder mit einer supraleitenden Beschichtung aus Yttrium Barium Cupraten (YBCO) in Längen bis über 1000 m erhältlich und würden die Kryotechnik deutlich vereinfachen.

Y211 „Pinning Centers“

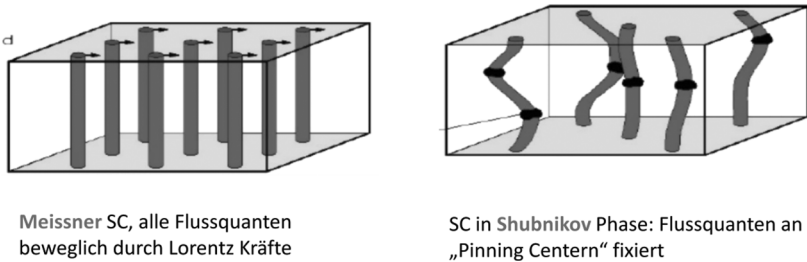


Abb. 12: Fixierung der Flussquanten durch Pinning Center im Shubnikov HTSL.

In dem in Abbildung 11b gezeigten Drehgestell mit den Magnetspulen ist das zusätzlich erforderliche Fahrwerk erkennbar, das bei Geschwindigkeiten unterhalb 80 km/h zum Einsatz kommt.

Eine weitere Möglichkeit, elektrodynamische Lager aufzubauen, ist die Nutzung einer permanentmagnetischen Erregung in Wechselwirkung mit Hochtemperatursupraleitern (HTSL) aus den bereits erwähnten YBCO Werkstoffen (Vgl. Abbildung 1). Durch die Permanentmagnete kann das Erregerfeld ohne Stromzufuhr z.B. auf einem rotierenden Teil aufgebaut werden, während auf der Statorseite kristalline Massivkörper aus YBCO genutzt werden, die das Analogon zu den Fahrbahnschienen bilden. YBCO Kristalle haben eine Sprungtemperatur von 90 K und können bei einer Arbeitstemperatur von 65..75 K betrieben werden. Die Kryo-Isoliertechnik ist bei diesen Temperaturen etabliert und die Kühlung selbst kann durch eine relativ einfache Stirling Kältemaschine erfolgen.

Für den Lagerungseffekt wird eine spezielle Eigenschaft der YBCO Kristalle genutzt, die auch die beschichteten Bänder aufweisen. Die magnetischen Flussquanten können an Störstellen im YBCO Kristall verankert werden, der Supraleiter befindet sich in der sog. Shubnikov Phase (Abbildung 12). Damit können die Flussquanten aufgrund der Wechselwirkung mit den Strömen im Supraleiter nicht aus diesem herausgedrängt werden, so dass ein stabiler Schwebezustand erreicht wird.

Werden die Supraleiter in Gegenwart des Erreger-Magnetfeldes unter die Sprungtemperatur gekühlt, verursacht jede Änderung des Erregerfeldes, z. B. durch Bewegung, konservative Ströme, die den alten Feldzustand im Supraleiter wieder herstellen wollen. Die dissipative Komponente verschwindet aufgrund der Supraleitung. Über das Lorentzgesetz werden dann Rückstellkräfte erzeugt, die den gelagerten Körper stabilisieren. Damit ist für einen stabilen Schwebezustand keine Mindestgeschwindigkeit mehr erforderlich (Abbildung 13).

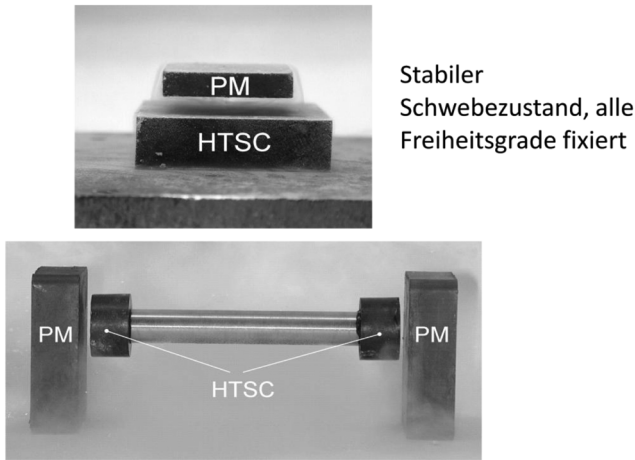


Abb. 13: Stabiler Schwebezustand im Stillstand mit Hilfe von HTSL.

Um nun eine Bewegung zuzulassen, muss das Erregerfeld so gestaltet werden, dass es sich in Bewegungsrichtung nicht ändert, so dass der Supraleiter keine Veranlassung hat, in dieser Richtung konservative Ströme auszubilden. Solche Feldkonfigurationen lassen sich mit Hilfe von Permanentmagneten in Flusskonzentratoranordnung und eisernen Polschuhen aufbauen. Weiter wird man versuchen, die Feldgradienten quer und senkrecht zur Bewegungsrichtung so hoch wie möglich zu machen, um schon bei kleinen Auslenkungen hohe Rückstellkräfte zu erhalten. Die in Abbildung 14 erkennbaren Eindrücke des Erreger-

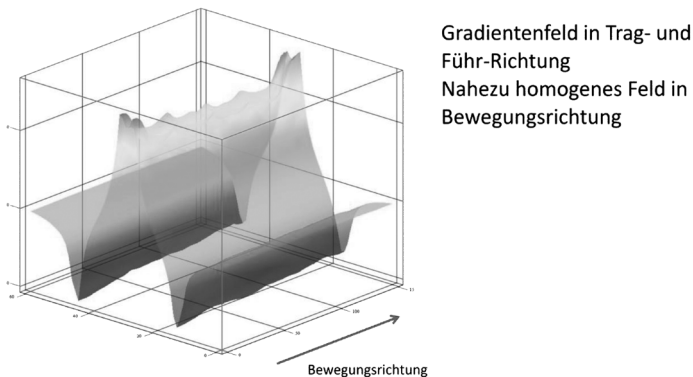


Abb. 14: Feldscan eines Erregersystems, das ein Gradientenfeld erzeugt.

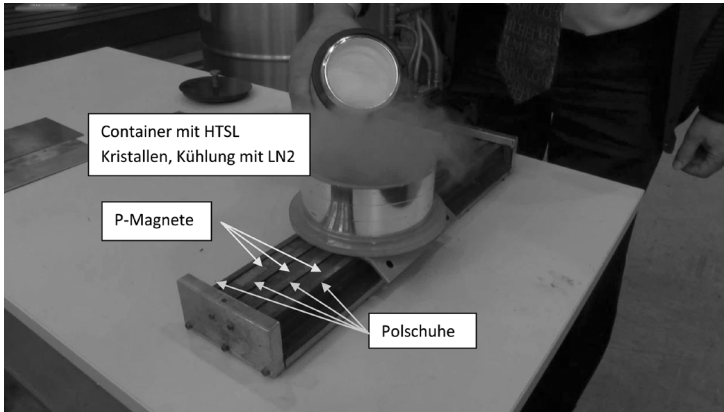


Abb.15: Labordemonstrator zum Schweben mit HTSL

feldes beruhen auf der Rückwirkung der Ströme in den diskreten HTSL Blöcken auf die Feldverteilung, stehen aber relativ zum Supraleiter still und verursachen keine bremsenden Kräfte. Lediglich die durch die Feldschwankungen in den Polschuhen des Erregersystems verursachten Wirbelströme haben Verluste und geringe Bremskräfte zur Folge.

Eine solche Schwebearrangement zeigt der Prinzipversuch in Abbildung 15. Die Berechnung der Stromverteilung im Supraleiter ist durchaus mit Hilfe der Maxwell'schen Theorie möglich, obwohl es sich hier um quantenmechanische Effekte handelt. Es sind lediglich zusätzliche Nebenbedingungen wie die kritische Stromdichte und deren Abhängigkeit von der Flussdichte entsprechend dem „Critical State Modell“ nach Bean / Kim in die Rechnung einzuführen. Wegen der stark nichtlinearen Feldverteilung bedient man sich zweckmäßig eines numerischen Feldberechnungsprogrammes. Dies ist beispielhaft in Abbildung 16 für eine zylindrische Anordnung dargestellt, bei der sich der Permanentmagnet dem Supraleiter annähert.

Die Plateaus der Stromdichteverteilung in Abbildung 16 resultieren aus der Tatsache, dass der Supraleiter mit der ihm eigenen kritischen Stromdichte auf Feldänderungen reagiert. Die Kräfte ergeben sich aus der Wechselwirkung des Feldes im HTSL mit den Strömen. Es entstehen abstoßende (F_z) und führende Kräfte (F_r). Die dargestellten Berechnungsmöglichkeiten gestatten die Auslegung und Optimierung supraleitender Lager für lineare und rotierende Anordnungen. Natürlich kann man sich vorstellen, auch mit dieser Technologie ein „Hoverboard“ zu bauen, wie es z.B. die Fa. Lexus in einem Internet Werbe Video vorgestellt hat (Abbildung 17).

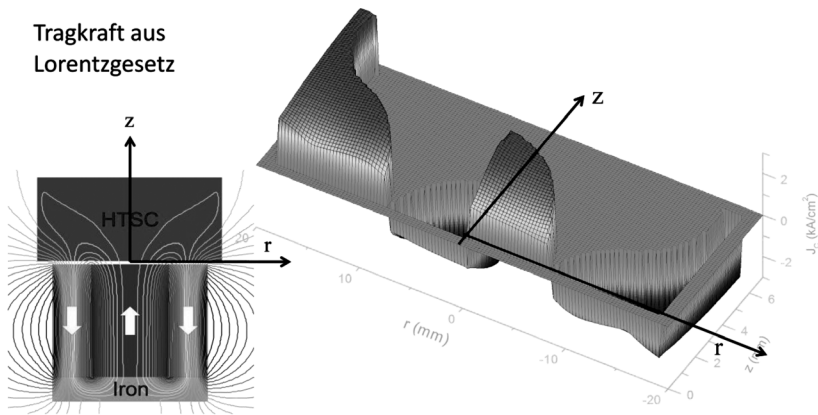


Abb. 16: Feld – und Stromdichteverteilung in der r-z-Ebene des Supraleiters mit einer kritischen Stromdichte von 2 kA/cm².



Abb. 17: Lexus „Hoverboard“ mit HTSL Lagerung, erkennbar ist der abdampfende Stickstoff.

In diesem aufwändig und sehr geschickt gemachten Video wird eine ähnliche Fahrbahnanordnung wie in Bild 15 verwendet. Sie ist jedoch verdeckt und durch die Kameraführung und die Aufnahmeperspektive wird der Eindruck einer zwei-

dimensionalen Beweglichkeit erweckt. Erst bei genauerem Hinsehen erkennt man, dass sich das Board auf einer fest vorgegeben Bahn bewegt.

Aktuelle Forschungen auf dem Gebiet der elektrodynamischen Lagerungen befassen sich zum Einen mit dem Ersatz der HTSL Massivkörper durch supraleitende Spulen aus Bandleitern und zum Anderen mit dem Ersatz der Permanentmagnete durch supraleitende Spulen, um so zu deutlich höheren Flussdichten und Steifigkeiten zu kommen.

Zusammenfassung

Berührungsfreie Lagerungen haben als aktive Magnetlager einen hohen technischen Stand erreicht und sich in industriellen Anwendungen beeindruckende Märkte erobert. Einen Überblick über spezifische Lagerdaten für die einzelnen Systeme gibt Tab. 1. Die passiven, inhärent stabilen elektrodynamischen Lagerungen erreichen speziell mit Hilfe der Supraleitung die für die Anwendung erforderlichen Steifigkeiten. Da besonders die noch junge Hochtemperatur Supraleiter Technik hierfür interessant ist, dürfte von einem erheblichen Entwicklungspotential ausgegangen werden. „Hoverboards“ mit ein- und zweidimensionaler Beweglichkeit wurden gebaut und in Internet Videos vorgestellt, sie sind jedoch prinzipbedingt an ein Reaktionsteil (Fahrbahn) gebunden und kommen der Vision der Filmvorlage aus 1987 nur sehr eingeschränkt nahe.

Tab. 1: Typische spezifische Lagerdaten (Bezugsgröße: Lagerfläche).

	Aerostatisch 8 bar	El. Magn. Lager	El. Dyn Lager	HTSL Lager	PM Lager	Wälzlager
Tragkraft [MPa]	0,36	0,4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	0,4	2,5
Steifigkeit [kPa/mm]	Lastabhängig 0,036	1600	16	16	1600, Neg. Steifigkeit quer zur Tragrichtung	(75600), stark abhängig vom Lagertyp
Verluste [W/t]	30, stark spaltabhängig	400..800	Geschwindig- keitsabhängig	0, aber Kryokühler ca. 200W..500W/t		460
Dämpfung	Durch Drossel- verluste, gering	Durch Regelung frei einstellbar	Durch Lagerverluste	extern	extern	extern
Typ. Spalt [mm]	$(5..10) \cdot 10^{-3}$	0,5..10	0,1..10 Bei Supral. Erregung bis 100 mm	Magn: 5..15 minus Cryostatwand	1..2	0